

Comparación entre Rectificador Monofásico con Conmutación Simétrica y Convertidor AC/AC para la Mejora del Factor de Potencia en Microcentrales Hidroeléctricas

Henry Bory Prevez ^{a,*}, Herminio Martínez García ^{b,*}, Luís Vázquez Seisdedos ^c

^a Departamento de Automática, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente Sede Mella, Ave Casero S/N, Santiago de Cuba, Cuba.

^b Departamento de Ingeniería Electrónica, Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) – BarcelonaTech, Av. de Eduard Maristany, n° 10 – 14, E-08019, Barcelona, España.

^c Departamento de Automática, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente Sede Mella, Ave Casero S/N, Santiago de Cuba, Cuba.

Resumen

En un trabajo anterior se compararon los convertidores de corriente alterna/corriente alterna (AC-AC), típicamente utilizados para la regulación de frecuencia en microcentrales hidroeléctricas variando la potencia disipada en cargas lastres, con un rectificador *trifásico* a diodos tipo puente con un interruptor, en serie con la carga, conmutado con ángulo simétrico. En el mismo, se demostró que, con dicho rectificador, se logra mejorar el factor de potencia a la salida del generador eléctrico, excepto para potencias consumidas por los usuarios cercanas a su valor mínimo. Una vía para solucionar este problema consiste en emplear una terna de rectificadores *monofásicos* a diodos tipo puente con un interruptor, en serie con la carga, conmutado con ángulo simétrico. Así, el objetivo del presente artículo es comparar al rectificador monofásico mencionado y el convertidor de AC-AC, esquema empleado actualmente, respecto a parámetros de interés como es el factor de potencia a la salida del generador eléctrico de las microcentrales hidroeléctricas que regulan frecuencia por el método de carga lastre.

Palabras Clave:

Electrónica de potencia, convertidores y accionadores eléctricos, sistemas eléctricos y electrónicos de potencia, rectificadores controlados, convertidores AC-AC conmutados, factor de potencia, control de frecuencia.

Comparison of Single-Phase Rectifier with Symmetrical Switching and AC-AC Converter for the Power Factor Improvement in Hydroelectric Micro-Plants.

Abstract

In a previous paper the authors compared the AC-AC converters, useful for the frequency regulation in hydroelectric micro-plants varying the power dissipated in ballasts loads, with the new proposal consisting in a bridge *three-phase* rectifier using diodes with a serial switch with the load that is switched with symmetric angle. The paper showed that the aforementioned rectifier accomplishes to improve the power factor at the generator output, except for low power consumed by users, near to its minimal value. A way to solve this problem consists in to use three bridge *single-phase* rectifier using diodes with a serial switch with the load that is switched with symmetric angle. As a consequence, the objective of this article is to carry out a comparison between the aforementioned single-phase rectifier and the AC-AC converter, regarding the power factor at the output of the electric generator of hydroelectric micro-plants that regulate frequency by means of the ballast-load method.

Keywords:

Power electronics, electric converters and actuators, power and electronic power systems. Controlled rectifiers, switching AC-AC converters, power factor, frequency control.

1. Introducción

Como es sobradamente conocido, en la actualidad se ha incrementado el interés por las fuentes de energías renovables (López *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014; Bordons *et al.*, 2015;

García *et al.*, 2016 y Real *et al.*, 2017), creándose las llamadas microrredes eléctricas que operan en modo islas, (Naqui *et al.*, 2013; Colak *et al.*, 2015; Farfán *et al.*, 2015; Farhat *et al.*, 2015; Ortega *et al.*, 2016 y Piris-Botalla *et al.*, 2016).

*Autor para la correspondencia: herminio.martinez@upc.edu

To cite this article: Henry Bory-Prevez, Herminio Martínez-García, Luís Vázquez-Seisdedos. 2018. Comparison of Single-Phase Rectifier with Symmetrical Switching and AC-AC Converter for the Power Factor Improvement in Hydroelectric Micro-Plants. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 00, 1–4. <https://doi.org/10.4995/riai.2018.9313>

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

En el presente artículo se enfoca la atención en el factor de potencia en los terminales del generador eléctrico de las microcentrales hidroeléctricas (μ CHs) que operan de forma autónoma, no conectadas al sistema eléctrico, en las cuales se regula la frecuencia manteniendo el caudal constante y modificando la potencia disipada en una carga lastre, mediante convertidores de corriente alterna/corriente alterna (AC-AC), conectada en paralelo con la carga de los usuarios, de modo tal que la potencia generada (P_G), que se desea mantener constante, sea igual a la potencia disipada por la carga lastre (P_L) más la potencia consumida por los usuarios (P_U) según la ecuación $P_G = P_L + P_U$ (Mare y Odello, 2001; Hechavarria; Bell, 2008; Peña et al., 2013; Kurtz y Botteró, 2014; Vasquez et al., 2014).

Motivado por lo anterior, se desarrolló el trabajo *Comparación entre Rectificador Trifásico con Conmutación Simétrica y Convertidor AC/AC para la Mejora del Factor de Potencia en Microcentrales Hidroeléctricas* (Bory et al., 2018), en el que se demuestra que al sustituir los tres convertidores de AC-AC, uno por cada fase del generador trifásico, por un rectificador trifásico en el que se conmuta el interruptor en serie con la carga con ángulo simétrico, se mejora el factor de potencia en los terminales del generador en el 94,5% del rango de variación de P_U , según un caso de estudio desarrollado. Sin embargo, para P_U cercanos al valor mínimo, el factor de potencia en los terminales del generador cuando se emplea el rectificador trifásico es inferior a cuando son empleados los convertidores de AC-AC, debido a que, para ángulos de conmutación cercanos a cero, el rectificador trifásico introduce una potencia de distorsión superior a la combinación de las potencias reactiva y de distorsión producida por el conjunto de los tres convertidores de AC-AC.

Para superar la dificultad anterior, los autores han continuado trabajando en una línea que permita sustituir el mencionado rectificador trifásico por una terna o conjunto de tres rectificadores monofásicos. Así pues, el objetivo del presente trabajo consiste en comparar el rectificador monofásico, conmutando el interruptor en serie con la carga con ángulo simétrico, y el convertidor AC-AC, que es el esquema actualmente más utilizado en el control de la frecuencia en una μ CH mediante carga lastre, con respecto a parámetros de interés como es el factor de potencia a la salida del generador eléctrico de microcentrales hidroeléctricas que regulan frecuencia por el citado método de carga lastre.

Los parámetros del sistema eléctrico a analizar en este artículo son: la corriente eficaz, las potencias activa, reactiva, aparente y de distorsión, así como el factor de potencia.

El artículo está organizado de la siguiente forma: la Sección 2 realiza una aproximación al estudio de los dos convertidores que se han comparado en el presente artículo. En concreto, en la Subsección 2.1 se realiza una breve reseña acerca de las expresiones de los índices de rendimiento y energéticos del convertidor AC-AC, que es el esquema más empleado actualmente, y en la Subsección 2.2, se realiza un análisis del rectificador monofásico con interruptor en serie con la carga conmutado con ángulo simétrico propuesto, obteniéndose las expresiones matemáticas de los índices de rendimiento y energéticos en función del ángulo de conmutación. A continuación, en la Sección 3, se desarrolla un ejemplo de aplicación a las microcentrales hidroeléctricas, donde se comparan la terna de rectificadores monofásicos y la

terna de convertidores AC-AC de acuerdo a los índices previamente mencionados, y se demuestra la ventaja del empleo del citado conjunto de rectificadores monofásicos con respecto al factor de potencia a la salida del generador. El artículo finaliza con la Sección 4, mostrando las conclusiones más destacadas.

2. Aproximación a los Convertidores Bajo Estudio

Como ya se ha comentado en la sección precedente, en esta sección se presenta una aproximación al estudio de los dos convertidores que se han comparado en el presente artículo: el convertidor AC-AC, que es el esquema más empleado actualmente, y la propuesta basada en el rectificador monofásico tipo puente con interruptor en serie con la carga lastre conmutado con ángulo simétrico.

2.1. Breve reseña sobre el Convertidor AC-AC

A continuación se realiza una breve reseña acerca de las expresiones matemáticas de los parámetros de rendimiento y energéticos mencionados anteriormente del convertidor AC-AC (Bory, 2011 y Bory et al., 2014) y estos fueron mostrados en (Bory et al., 2018) junto al principio de funcionamiento de dicho convertidor.

Como el sistema es trifásico, existe un convertidor en cada fase que regula la cantidad de energía transferida del generador a las cargas lastres. Además, como se considera que: (1) los convertidores están conectados en estrella, (2) son conmutados con el mismo ángulo de disparo, (3) se emplea la conexión a cuatro hilos, y (4) el sistema es equilibrado tanto en generación como en carga, basta con analizar una fase para obtener los resultados del conjunto trifásico (Bory et al., 2018).

En la Figura 1 se muestra el esquema de simulación del convertidor AC-AC en PSIM® para una fase.

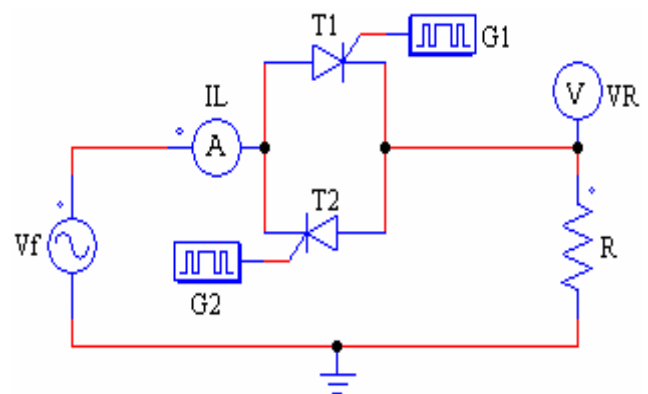


Figura 1: Esquema de simulación del convertidor AC-AC.

Este esquema de simulación está compuesto por una fuente de tensión sinusoidal (V_f) que representa una fase del generador, de tensión eficaz (V_{ef}) 110 V y frecuencia 60 Hz, un convertidor AC-AC, constituido por los tiristores $T1$ y $T2$ en antiparalelo, los generadores para el disparo ($G1$ y $G2$) cuya función es dar los pulsos de disparo a los tiristores, con ajuste de parámetros de frecuencia (60 Hz), de número de puntos de conmutación (dos) y de puntos de conmutación (se indica el ángulo de disparo deseado), y, finalmente, resistencia de carga que representa la carga lastre en una de las tres fases ($R=4,03 \Omega$).

El valor eficaz de la corriente de entrada al convertidor viene dado por la expresión:

$$I_{rms} = \frac{V_{ef}}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right]}, \quad (1)$$

y la potencia activa de entrada al convertidor AC-AC:

$$P_{ent} = \frac{V_{ef}^2}{\pi R} \left[\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right] \quad (2)$$

Para $\alpha = 0$ la potencia activa es máxima, de valor $P_{\alpha 0} = V_{ef}^2 / R$, lo que se corresponde con el comportamiento del convertidor como un circuito resistivo puro.

Por otro lado, la potencia reactiva de entrada al convertidor AC-AC viene dada por:

$$Q_{ent} = \frac{V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{1 - \cos(2\alpha)}{2} \right] \quad (3)$$

La expresión (3) muestra que esta potencia es positiva, indicando que se consume del generador. En la Figura 2 se presenta la gráfica de la potencia reactiva de entrada dividida entre la potencia activa máxima, en función del ángulo de disparo. Es interesante resaltar que la potencia reactiva alcanza su valor máximo de 0,318 veces la potencia activa máxima, que es la máxima potencia reactiva consumida del generador.

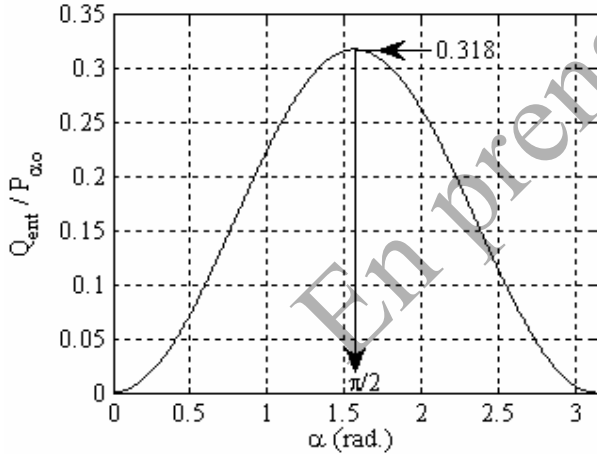


Figura 2: Gráfica de la relación $Q_{ent} / P_{\alpha 0}$ en función del ángulo de disparo (Bory et al., 2008).

De la figura anterior se aprecia que cada convertidor AC-AC, utilizado para el control de la potencia a disipar en una resistencia lastre, consume potencia reactiva inductiva, contribuyendo a empeorar el factor de potencia en los terminales del generador eléctrico (Bory et al., 2018).

La potencia aparente de entrada al convertidor AC-AC es:

$$S_{ent} = \frac{V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right]} \quad (4)$$

Esta potencia, para $\alpha = 0$, posee su valor máximo igual a la potencia activa máxima disipada en la resistencia de carga.

La potencia de distorsión surge cuando en un circuito existen formas de ondas no sinusoidales y se define como la raíz cuadrada positiva de la diferencia de la potencia aparente al cuadrado y la suma de los cuadrados de la potencia activa y reactiva. A la entrada del convertidor AC-AC, esta viene dada por la expresión:

$$T_{ent} = \frac{\sqrt{2} V_{ef}^2}{2\pi R} \sqrt{2\alpha(\pi - \alpha) + (2\alpha - \pi)\sin(2\alpha) + \cos(2\alpha) - 1} \quad (5)$$

Finalmente, el factor de potencia viene dado por:

$$fp = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right]} \quad (6)$$

Para $\alpha = 0$, el factor de potencia $fp = 1$ pues, para este ángulo, la corriente de entrada al convertidor es sinusoidal pura y está en fase con la tensión de entrada.

Como fue expuesto en (Bory et al., 2018), el sistema es trifásico y, por tanto, existe un convertidor AC-AC en cada fase, que se supone se conmutan con el mismo ángulo de disparo y poseen igual carga (sistema trifásico equilibrado), las expresiones de las potencias totales y factor de potencia son:

- Potencia activa trifásica P_{3ent} :

$$P_{3ent} = 3P_{ent} = 3 \frac{V_{ef}^2}{\pi R} \left[\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right] \quad (7)$$

- Potencia reactiva trifásica Q_{3ent} :

$$Q_{3ent} = 3Q_{ent} = 3 \frac{V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{1 - \cos(2\alpha)}{2} \right] \quad (8)$$

- Potencia aparente trifásica S_{3ent} :

$$S_{3ent} = 3S_{ent} = 3 \frac{V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right]} \quad (9)$$

- Factor de potencia de la red trifásica fp_3 :

$$fp_3 = \frac{P_{3ent}}{S_{3ent}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right]} \quad (10)$$

2.2. Análisis del Rectificador Monofásico Tipo Puente con Interruptor en Serie con la Carga Lastre Conmutado con Ángulo Simétrico

Para la obtención de las expresiones matemáticas de los parámetros de rendimiento y energéticos mencionados anteriormente del conjunto de rectificadores monofásicos, se realizan las siguientes consideraciones: (1) como el sistema es trifásico, existe un rectificador monofásico en cada fase

que regula la cantidad de energía transferida del generador a las cargas lastres, (2) los rectificadores están conectados en estrella, (3) son conmutados con el mismo ángulo de conmutación, (4) se emplea la conexión a cuatro hilos, y (5) como el sistema es equilibrado, tanto en generación como en carga, basta con analizar una fase para obtener los resultados del conjunto trifásico.

En la Figura 3 se muestra el esquema de simulación del rectificador monofásico con interruptor en serie con la carga lastre. En esta subsección se determinarán las expresiones de los mismos índices de rendimiento y energéticos antes mencionados en función del ángulo de conmutación para el citado rectificador.

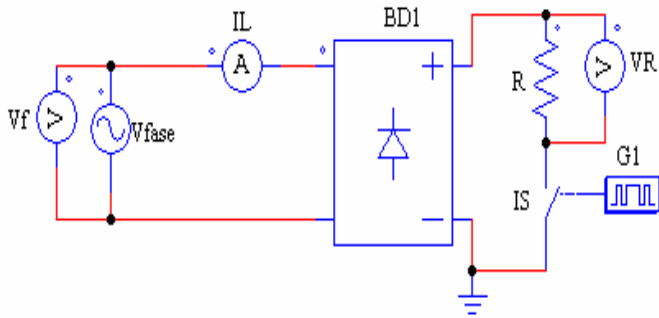


Figura 3: Esquema de simulación del rectificador monofásico con interruptor en serie con la carga lastre.

Los elementos que componen el esquema son: fuente de tensión sinusoidal monofásica (V_{fase}) de 60 Hz y de tensión eficaz (V_{ef}) igual a 110 V, y representa una fase del generador; puente rectificador monofásico a diodos (BD1), interruptor (IS) que representa un elemento de conmutación como transistor bipolar de potencia o IGBT; generador de disparo (G1) que representa a la unidad de control, y su función es aplicar un pulso al interruptor según la forma de conmutar con ángulo simétrico y con valor del ángulo de conmutación deseado, con parámetros frecuencia (120 Hz), número de puntos de conmutación (2) y puntos exactos de conmutación (ángulo y ancho deseados); y la resistencia de carga (R), que representa la carga lastre ($R=4,03 \Omega$ en el caso considerado).

El funcionamiento del esquema es el siguiente: los diodos del puente conducen un máximo de $\pi \text{ rad}$, y conmutan naturalmente cada $\pi \text{ rad}$ por lo que la tensión instantánea producida por el puente está compuesta por dos segmentos, de duración igual a $\pi \text{ rad}$. A partir de este punto, para la conmutación con ángulo de control simétrico, se cierra el interruptor IS un ángulo α después del cruce por cero, de valores negativos a positivos, de la tensión de la fuente y se abre IS el mismo α antes del cruce por cero de valores positivos a negativos, de esto se deduce que el rango de regulación es: $0 \leq \alpha \leq \pi/2$.

En la Figura 4 se representan las formas de onda más significativas tanto de tensión como de corriente del circuito rectificador monofásico tipo puente a diodos con interruptor en serie con la carga, para un caso particular en que se conmuta al interruptor con un ángulo α de $\pi/6 \text{ rad}$ (es decir, 30°).

La forma de onda de la corriente de entrada al rectificador, $i_L(\theta)$, es como la mostrada en la Figura 4(c), tiene período

$T_{LL} = 2\pi$, y cuya expresión analítica se expresa mediante las ecuaciones dadas en (11).

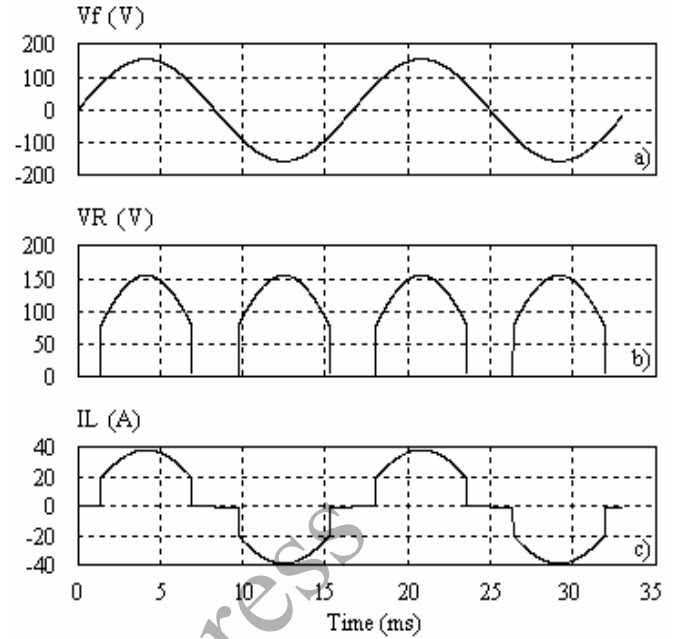


Figura 4: Gráficas de las formas de onda más significativas del rectificador monofásico conmutado con ángulo simétrico, para un ángulo α de $\pi/6 \text{ rad}$ (es decir, 30°). (a) Tensión de una fase de la fuente, (b) Tensión en la carga, (c) Corriente en la línea.

$$i_L(\theta) = \begin{cases} 0 & 0 < \theta < \alpha \\ \frac{\sqrt{2}V_{ef}}{R} \sin(\theta) & \alpha < \theta < \pi - \alpha \\ 0 & \pi - \alpha < \theta < \pi + \alpha \\ \frac{\sqrt{2}V_{ef}}{R} \sin(\theta) & \pi + \alpha < \theta < 2\pi - \alpha \\ 0 & 2\pi - \alpha < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (11)$$

En la Figura 4(c), se observa que la corriente de entrada al rectificador posee simetría impar y de media onda, lo que implica que, en la correspondiente serie de Fourier, dada por la expresión:

$$i_L(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta), \quad (12)$$

los coeficientes $a_0 = 0$, $a_n = 0$ para todo n y $b_n = 0$ para todo valor de n par. Es conveniente destacar que, como el coeficiente a_1 es nulo, el rectificador monofásico para la forma de conmutar analizada no consume ni genera potencia reactiva para ningún valor posible del ángulo de conmutación.

Determinando el coeficiente b_1 :

$$b_1 = \frac{8}{T_{LL}} \int_0^{T_{LL}/4} i_L(\theta) \sin(\theta) d\theta = \frac{8}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi/2} \frac{\sqrt{2}V_{ef}}{R} \sin(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (13)$$

$$b_1 = \frac{\sqrt{2}V_{ef}}{\pi R} [\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)] \quad (14)$$

Este coeficiente indica qué valor posee la amplitud del primer armónico de la corriente a la entrada del rectificador en función del ángulo de conmutación. Así pues, el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente de entrada es:

$$I_{1rms} = \frac{V_{ef}}{\pi R} [\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)] \quad (15)$$

Para $\alpha = 0$, el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente de entrada al convertidor alcanza su valor máximo, siendo igual a $I_{1rmsm\acute{a}x} = V_{ef}/R$, debido a que, para este valor de α , la resistencia de carga es conectada en paralelo con V_{fase} , y para $\alpha = \pi/2$ se anula, siendo éste su valor mínimo.

Conviene destacar que, el ángulo de desplazamiento ϕ_1 , desfase entre la tensión instantánea de fase y el primer armónico de corriente a la entrada al rectificador, es nulo para cualquier valor del ángulo de control, indicando que no existe desfase entre la tensión de alimentación de fase y el primer armónico de la corriente de entrada al rectificador, lo que corrobora lo comentado anteriormente: que el rectificador no consume ni genera potencia reactiva. Como consecuencia, puede afirmarse que el factor de potencia de desplazamiento, $\cos(\phi_1)$, es igual a la unidad.

El valor eficaz de la corriente de entrada al rectificador es:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{2}{T_{IL}} \int_0^{T_{IL}/2} [i_L(\theta)]^2 d\theta} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} \left[\frac{\sqrt{2}V_{ef}}{R} \sin(\theta) \right]^2 d\theta} \quad (16)$$

$$I_{rms} = \frac{V_{ef}}{R} \sqrt{\frac{\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi}} \quad (17)$$

Determinando la potencia activa a la entrada del rectificador empleando la componente del armónico fundamental de la corriente de entrada en fase con la tensión de fase, queda:

$$P_{entBD} = V_{ef} \frac{b_1}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

$$P_{entBD} = \frac{V_{ef}^2}{\pi R} [\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)] \quad (19)$$

Para $\alpha = 0$, la potencia activa a la entrada del rectificador es máxima, siendo su valor $P_{entBDM\acute{a}x} = V_{ef}^2/R$, lo que se corresponde con el comportamiento del rectificador como un circuito resistivo puro, pues para este valor de α , la fuente (V_{fase}) ve conectada a ella una resistencia pura, siendo dicha $P_{entBDM\acute{a}x}$ la potencia que se disipa en la citada resistencia. En cambio, para $\alpha = \pi/2$, ésta es nula, valor mínimo alcanzable. Si se divide (19) por $P_{entBDM\acute{a}x}$, se obtiene la expresión de la

potencia activa normalizada, cuyo gráfico es mostrado en la Figura 5.

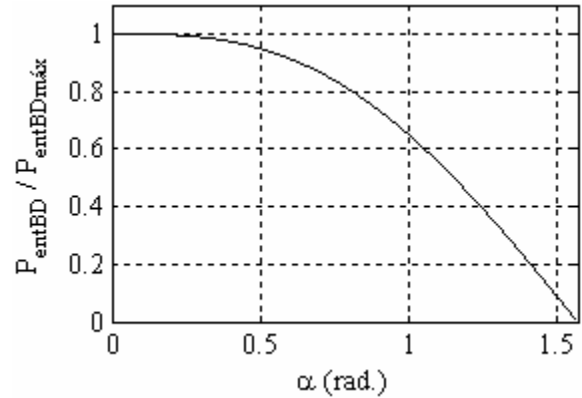


Figura 5: Gráfica de $P_{entBD} / P_{entBDM\acute{a}x}$ en función de α .

La potencia aparente de entrada viene dada por:

$$S_{entBD} = V_{rms} I_{rms} \quad (20)$$

$$S_{entBD} = \frac{V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi}} \quad (21)$$

Para $\alpha = 0$, la potencia aparente a la entrada del rectificador alcanza su valor máximo $S_{entBDM\acute{a}x} = V_{ef}^2/R$, igual a la potencia activa máxima disipada en la resistencia de carga. En cambio, para $\alpha = \pi/2$, la potencia aparente es nula, su valor mínimo, ya que la fuente no entrega energía a la carga. Esta potencia tiene una curva aproximadamente parabólica como indica (21).

Por otro lado, la potencia de distorsión a la entrada del rectificador se determina como:

$$T_{entBD} = \sqrt{S_{entBD}^2 - P_{entBD}^2} \quad (22)$$

$$T_{entBD} = \frac{V_{ef}^2}{\pi R} \sqrt{[2\alpha - \sin(2\alpha)] \cdot [\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)]} \quad (23)$$

Para $\alpha = 0$, se tiene que $T_{entBD} = 0$, debido a que la corriente de entrada al rectificador es sinusoidal, y para $\alpha = \pi/2$, $T_{entBD} = 0$, pues la corriente de entrada es nula.

En la Figura 6 se muestra el gráfico de la potencia de distorsión de entrada dividida entre $P_{entBDM\acute{a}x}$, en función de α . En la citada figura, puede observarse que para $\alpha = \pi/2,72$, esta potencia alcanza su valor máximo de 0,5 veces $P_{entBDM\acute{a}x}$.

Finalmente, el rectificador monofásico con interruptor en serie con la carga lastre posee un factor de potencia expresado como:

$$fp = \frac{P_{entBD}}{S_{entBD}} = \frac{\frac{V_{ef}^2}{\pi R} [\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)]}{\frac{V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi}}} \quad (24)$$

$$fp = \sqrt{\frac{\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi}} \quad (25)$$

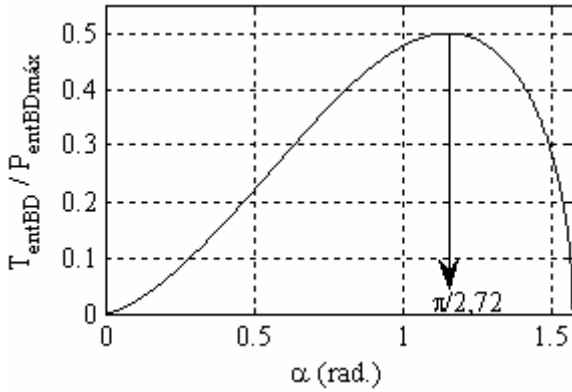


Figura 6: Gráfica de $T_{entBD} / P_{entBDmáx}$ en función del ángulo de conmutación.

Debe notarse que para $\alpha = 0$, el factor de potencia queda $fp = 1$, debido a que la corriente de entrada al rectificador para este ángulo es sinusoidal y está en fase con la tensión V_{fase} . El factor de potencia tiene una curva aproximadamente parabólica, tal y como señala (25).

Se recuerda que la potencia reactiva a la entrada del rectificador, alimentado con una tensión monofásica sinusoidal, es:

$$Q_{entBD} = V_{ef} a_1 / \sqrt{2} = 0, \quad (26)$$

resultado esperado a resaltar, y que demuestra que el rectificador bajo la forma de conmutar descrita no contribuye a incrementar la energía reactiva del sistema (es decir, no consume ni aporta energía reactiva al generador), lo que se considera una mejora respecto al esquema de uso actual mediante convertidores AC-AC, que sí consumen potencia reactiva, contribuyendo con este consumo de reactiva, a empeorar el factor de potencia a la salida del generador.

Como el sistema es trifásico y, por tanto, existe un rectificador monofásico en cada fase, que se supone se conmutan con el mismo ángulo de conmutación y poseen igual carga (sistema trifásico equilibrado), las expresiones de las respectivas potencias totales y factor de potencia son:

- Potencia activa trifásica P_{3entBD} :

$$P_{3entBD} = 3P_{entBD} = 3 \frac{V_{ef}^2}{\pi R} [\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)] \quad (27)$$

- Potencia reactiva trifásica Q_{3entBD} :

$$Q_{3entBD} = 3Q_{entBD} = 0 \quad (28)$$

- Potencia aparente trifásica S_{3entBD} :

$$S_{3entBD} = 3S_{entBD} = 3 \frac{V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi}} \quad (29)$$

- Factor de potencia de la red trifásica fp_{3BD} :

$$fp_{3BD} = \frac{P_{3entBD}}{S_{3entBD}} = \sqrt{\frac{\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi}} \quad (30)$$

3. Resultados y Discusión

De igual forma a la llevada a cabo en (Bory *et al.*, 2018) para comparar el rectificador trifásico tipo puente con interruptor en serie con la carga con el esquema que emplea los convertidores AC-AC, en la presente sección se desarrolla el mismo caso de estudio, pero esta vez, para comparar el rectificador monofásico conmutado con ángulo simétrico propuesto, frente al convertidor AC-AC que, como ya ha sido comentado, es el esquema actualmente más empleado en el control de la frecuencia en una μCH mediante carga lastre. Además, a continuación se consideran ambos bloques (terna de rectificadores y terna de convertidores AC-AC) incluidos cada uno en su respectivo conjunto generación-consumo para comparar entre sí las prestaciones de ambos sistemas.

Como ejemplo numérico, supóngase que, teniendo un registro de mediciones de la potencia, la tensión y corriente eficaces en una μCH , se conozca, además, que la potencia activa mínima demandada por los usuarios, P_{UMIN} , sea de 3 kW; que la potencia activa máxima demandada por los usuarios, P_{UMAX} , sea de 12 kW y que, en cierto horario, la potencia demandada por los usuarios sea $P_U = 7,5$ kW con un factor de potencia, fp_U de 0,7 en atraso.

Según los datos del ejemplo numérico en (Bory *et al.*, 2018) se obtuvo que los valores de la resistencia, inductancia por fase que representan la carga de los usuarios, la corriente eficaz en cada fase y la potencia reactiva total consumida por estos son: $R_U = 2,37 \Omega$, $L_U = 6,418$ mH, $I_U = 32,47$ A y $Q_U = 7,65$ kVAR respectivamente, cuando estos demandan la potencia P_U con un factor de potencia de 0,7.

Caso de Estudio— Para el esquema actual, que emplea los convertidores AC-AC, en (Bory *et al.*, 2018) se determinó que el valor de las tres resistencias lastres es $R_{Lastre} = 4,03 \Omega$, y en el horario en que los usuarios consumen la potencia P_U , cada convertidor CA-CA debe conmutarse con un ángulo de disparo de $\pi/2$ rad, con lo cual cada uno consume una potencia activa de 1,5 kW, y se obtienen los valores teóricos siguientes:

- La corriente eficaz de entrada por convertidor, expresada mediante (1), $I_{ACAC} = 19,30$ A.
- Potencia activa por fase, dada por la expresión (2), $P_{fACAC} = 1,5$ kW, y total, $P_{ACAC} = 4,5$ kW.
- Potencia reactiva por fase, mostrada por (3), $Q_{fACAC} = 0,955$ kVAR, y total, $Q_{ACAC} = 2,864$ kVAR.
- Potencia aparente por fase, dada por (4), $S_{fACAC} = 2,123$ kVA, y total, $S_{ACAC} = 6,369$ kVA.
- Potencia de distorsión por fase, expresada por (5), $T_{fACAC} = 1,157$ kVAD, y total, $T_{ACAC} = 3,473$ kVAD.
- El factor de potencia, dado por (6), $fp_{ACAC} = 0,7071$.

En (Bory *et al.*, 2018) fue presentado que en los terminales de salida del generador, los valores de la potencia activa (P_G), la potencia reactiva (Q_G) kVAR, la potencia aparente (S_G), la potencia de distorsión (T_G) y el factor de potencia (fp_G) vienen dados, respectivamente, por:

- La potencia activa total: $P_G=12,000$ kW.
- La potencia reactiva total: $Q_G=10,514$ kVAR.
- La potencia aparente total: $S_G=16,330$ kVA.
- La potencia de distorsión total: $T_G=3,473$ kVAD.
- El factor de potencia: $fp_G=0,735$.

En este punto se considera la terna de rectificadores monofásicos conmutados con ángulo simétrico para el control de la potencia a disipar en las cargas lastres, así, se impone calcular el valor de dicha resistencia que es el mismo para cada rectificador. Este valor se determina a partir de la potencia activa máxima que debe consumir cada rectificador monofásico, $P_{BDmáx}$, que según el ejemplo numérico bajo estudio es $P_{BDmáx}=(P_{UMAX}-P_{UMIN})/3=3$ kW. Ahora, ya conocida $P_{BDmáx}$, y evaluando la expresión (19) para $\alpha=0$, se tiene:

$$R_{Lastre1} = R_{Lastre2} = R_{Lastre3} = R_{Lastre} = \frac{V_{ef}^2}{P_{BDmáx}} = 4,03 \Omega \quad (31)$$

Puede observarse que se ha empleado el mismo símbolo, R_{Lastre} , para representar el valor de las cargas lastres para la terna de convertidores AC-AC y para la terna de rectificadores, esto se debe a que el valor numérico de estas cargas es el mismo.

Como en el horario en que los usuarios consumen la potencia P_U , cada rectificador debe consumir una potencia activa, P_{BD} de 1,5 kW, esto se logra conmutando cada rectificador con $\alpha=1,155$ rad. Para este valor de α y de las resistencias lastres, los valores teóricos de las corrientes eficaces, potencias y factor de potencia en la entrada de cada rectificador son, respectivamente:

- La corriente eficaz, dada por (17), $I_{BDA}=I_{BDB}=I_{BDC}=19,30$ A.
- La potencia activa por fase, expresada por (19), $P_{fBD}=1,5$ kW, y total, dada por (27), $P_{3BD}=4,5006$ kW.
- La potencia reactiva por fase, dada por la expresión (26), $Q_{fBD}=0$ kVAR, y total, dada por (28), $Q_{3BD}=0$ kVAR.
- La potencia aparente por fase, expresada por (21), $S_{fBD}=2,123$ kVA, y total, dada por (29), $S_{3BD}=6,369$ kVA.
- La potencia de distorsión por fase, mostrada en (23), $T_{fBD}=1,501$ kVAD, y total, $T_{3BD}=4,503$ kVAD.
- El factor de potencia por fase, dado por (25), $fp_{fBD}=0,7071$, y total, dado por (30), $fp_{3BD}=0,7071$.

En los terminales del generador para las condiciones de carga impuestas por los usuarios y de los rectificadores, la potencia activa total (P_L), potencia reactiva total (Q_L), potencia aparente total (S_L), potencia de distorsión total (T_L) y el factor de potencia (fp_L) son, respectivamente:

- La potencia activa total: $P_L=12,00$ kW.
- La potencia reactiva total: $Q_L=7,65$ kVAR.
- La potencia aparente total: $S_L=14,926$ kVA.
- La potencia de distorsión total: $T_L=4,503$ kVAD.
- El factor de potencia: $fp_L=0,8033$.

En la Figura 7 se presenta el esquema empleado para las simulaciones en PSIM® de un sistema generación-consumo donde se incluye la terna de rectificadores monofásicos, uno por cada fase.

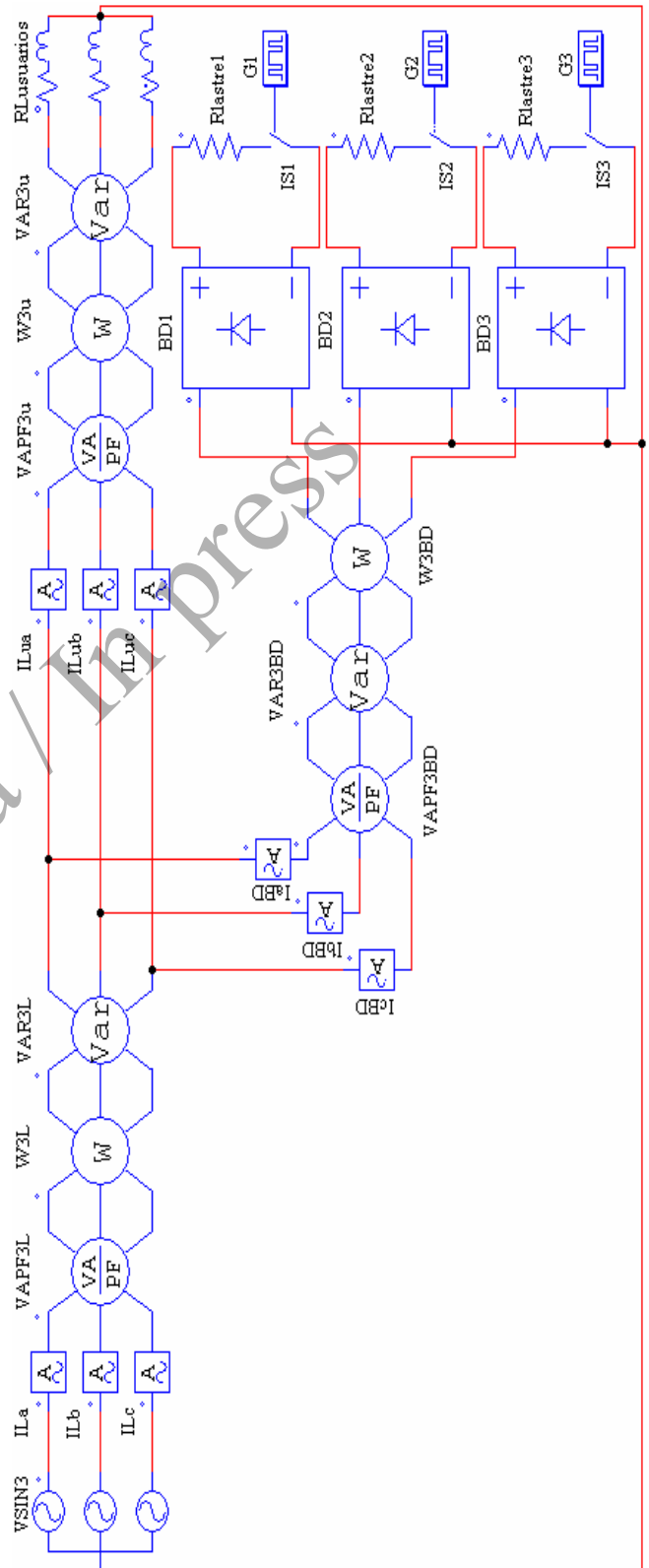


Figura 7: Esquema de simulación PSIM® generación-consumo con la terna de rectificadores trifásicos considerados.

Los elementos que componen al esquema mostrado en la Figura 7 son: fuente de tensión sinusoidal VSIN3, que

representa al generador; la carga de los usuarios, **RLusuarios**; los rectificadores monofásicos propuestos constituidos por **BD1**, **BD2**, **BD3**, **IS1**, **IS2**, **IS3**, **G1**, **G2** y **G3**; las cargas lastres **Rlastre1**, **Rlastre2** y **Rlastre3**; los amperímetros de corriente alterna (**ILa**, **ILb**, **ILc**, **ILua**, **ILub**, **ILuc**, **IaBD**, **IbBD**, e **IcBD**) que miden los valores eficaces en cada fase de la corriente en los terminales del generador, en la carga que representa a los usuarios, y en los rectificadores propuestos respectivamente, y los vatímetros, varímetros y medidores de potencia aparente y factor de potencia (**W3L**, **VAR3L**, **VAPF3L**, **W3u**, **VAR3u**, **VAPF3u**, **W3BD**, **VAR3BD**, y **VAPF3BD**) para medir las potencias totales y factor de potencia a la salida del generador, en la carga de los usuarios y en la entrada de los puentes rectificadores, respectivamente.

A modo aclaratorio, debe decirse que la diferencia entre el esquema de simulación mostrado en la Figura 7 y el del sistema actualmente empleado, basado en convertidores AC-AC, consiste en la sustitución de cada uno de los tres convertidores AC-AC, cada uno conectado entre una fase y el neutro del generador, por un rectificador monofásico. La notación utilizada en los instrumentos de medición y, por tanto, para las variables medidas asociadas a estos convertidores, finaliza con ACAC en el sistema con convertidores AC-AC y con BD en la propuesta con rectificadores monofásicos.

Con el objetivo de llevar a cabo una comparativa entre los resultados calculados y de simulación de los esquemas con la terna de convertidores AC-AC y con la de rectificadores monofásicos conmutados con ángulo simétrico, se elaboró la Tabla 1. En dicha Tabla, se emplearon los símbolos I_S , P_S , Q_S , S_S y fp_S , para denotar las variables corriente eficaz, las potencias activa, reactiva, aparente y el factor de potencia, respectivamente, a la entrada del rectificador o del convertidor, y los símbolos I_{GS} , P_{GS} , Q_{GS} , S_{GS} y fp_{GS} , para representar las mismas variables pero a la salida del generador. El subíndice S indica que son valores obtenidos mediante simulación.

Tabla 1: Comparación entre los resultados calculados y de simulación de los esquemas con la terna de convertidores AC-AC y la terna de rectificadores monofásicos conmutados con ángulo simétrico.

	Terna de Convertidores AC-AC		Terna de Rectificadores Monofásicos	
	Calculado	Simulado	Calculado	Simulado
I_{GS}		49,45 A		45,19 A
P_{GS}	12,000 kW	12,004 kW	12,000 kW	12,002 kW
Q_{GS}	10,514 kVAR	10,522 kVAR	7,65 kVAR	7,652 kVAR
S_{GS}	16,330 kVA	16,323 kVA	14,926 kVA	14,922 kVA
fp_{GS}	0,735	0,7354	0,8033	0,8043
I_S	19,30 A	19,27 A	19,30 A	19,27 A
P_S	4,5 kW	4,504 kW	4,500 kW	4,502 kW
Q_S	2,864 kVAR	2,865 kVAR	0 VAR	-4,043 VAR
S_S	6,364 kVA	6,364 kVA	6,369 kVA	6,366 kVA
fp_S	0,7071	0,7077	0,7071	0,7071

En una primera comparación entre los valores obtenidos mediante cálculos y simulación, mostrados en la Tabla 1, se observa una excelente correspondencia entre estos. Se ha de

destacar que el valor de la potencia reactiva, dado por la simulación, correspondiente al esquema con rectificadores, fila Q_S (mostrada en negrita), se considera nulo debido a su pequeña magnitud, constituyendo esto la ventaja del esquema con rectificadores conmutados con ángulo simétrico respecto al esquema con convertidores AC-AC, cuyo consumo de potencia reactiva, para el ángulo de control en cada convertidor de $\pi/2$ rad, representa un 37,4% de la reactiva total consumida por los usuarios.

Con respecto al factor de potencia en los terminales de la fuente que representa al generador, fila fp_{GS} de la Tabla 1, se aprecia que dicho parámetro para el esquema con rectificadores monofásicos conmutados con ángulo simétrico, es mayor que en el esquema con convertidores AC-AC. Esto se debe a que, como fue comentado en el párrafo anterior, el primero no consume energía reactiva, lo que a su vez produce una disminución de la corriente eficaz aproximadamente de 4,2 A, ver fila I_{GS} de la Tabla 1, en cada fase del generador aumentando la disponibilidad de este en lo referente a la entrega de potencia activa.

Es interesante resaltar que, a pesar que el factor de potencia en los terminales de entrada de los rectificadores monofásicos, última fila de la Tabla 1 (parámetro fp_S), es aproximadamente igual al factor de potencia en los terminales de entrada de los convertidores AC-AC, se logra mejorar, con el uso de rectificadores monofásicos conmutados con ángulo simétrico, el factor de potencia a la salida del generador (valor de fp_{GS}).

En la Figura 8 se representan gráficamente tanto el factor de potencia a la salida del generador cuando se emplean los rectificadores monofásicos, fp_{GSBD} , como cuando se emplean los convertidores AC-AC, $fp_{GSAC-AC}$, obtenidos mediante simulación, para el rango de variación de la potencia activa de los usuarios considerada en el ejemplo y con un factor de potencia de los usuarios, fp_U , de 0,7 en atraso.

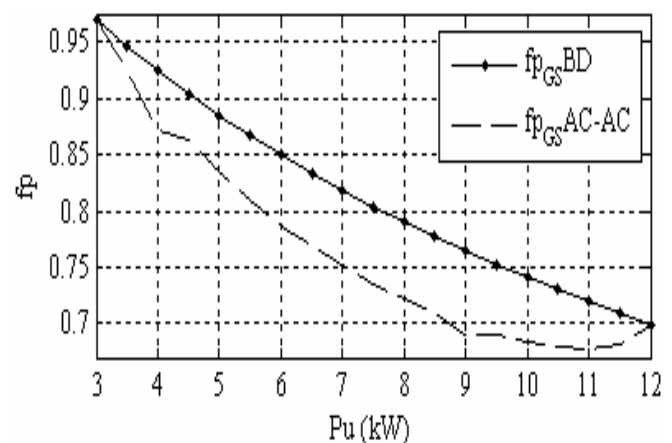


Figura 8: Comparación entre el factor de potencia a la salida del generador cuando se emplean: los rectificadores monofásicos, fp_{GSBD} , y los convertidores de AC-AC, $fp_{GSAC-AC}$.

En la citada Figura 8 se observa que fp_{GSBD} supera a $fp_{GSAC-AC}$ en todo el rango de variación de la potencia activa consumida por los usuarios, P_u , excepto para P_u igual a 3,0 kW, que $fp_{GSBD}=fp_{GSAC-AC}=0,97$, y para P_u igual a 12,0 kW, que $fp_{GSBD}=fp_{GSAC-AC}=0,699$. El máximo valor de la diferencia de fp_{GSBD} y $fp_{GSAC-AC}$ igual a 0,075 y la diferencia de fp_{GSBD} y $fp_{GSAC-AC}$ es superior a 0,06 para P_u desde 6,0 kW hasta 9,5 kW.

En la Figura 9 se representan gráficamente la corriente eficaz de una fase del generador eléctrico cuando se emplean tanto los rectificadores monofásicos, I_{GSBD} , como los convertidores AC-AC, $I_{GSAC-AC}$, obtenida mediante simulación, para el rango de variación considerado de la potencia activa de los usuarios en el ejemplo y con un fp_U de 0,7 en atraso. Conviene indicar que sólo se toma la corriente de una fase porque el sistema se considera equilibrado tanto en generación como en carga.

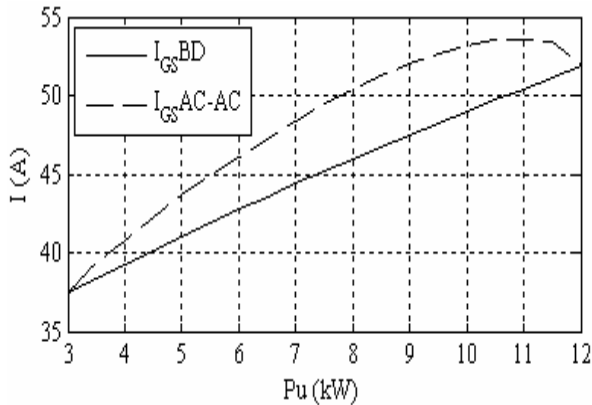


Figura 9: Comparación entre la corriente eficaz a la salida del generador cuando se emplean: los rectificadores monofásicos, I_{GSBD} , y los convertidores de AC-AC, $I_{GSAC-AC}$.

En la citada Figura 9 se aprecia que $I_{GSAC-AC}$ supera a I_{GSBD} en todo el rango de variación de la potencia activa consumida por los usuarios, encontrándose el máximo valor de la diferencia entre $I_{GSAC-AC}$ e I_{GSBD} igual a 4,5 A en cada fase, para $P_U=8,5$ kW. Cabe indicarse que esto siempre bajo la consideración de sistema balanceado en generación y en carga implica que aumente, para $P_U=8,5$ kW, la disponibilidad del generador en 13,5 A.

Finalmente, como se mencionó en la sección introducción, en (Bory et al., 2018) de la comparativa entre el rectificador trifásico en el que se conmuta el interruptor en serie con la carga con ángulo simétrico y los convertidores de AC-AC, respecto al factor de potencia en los terminales del generador para un caso de estudio similar al del presente artículo, se obtuvieron las curvas fp_{GSBD3} y $fp_{GSAC-AC}$ mostradas en la Figura 10.

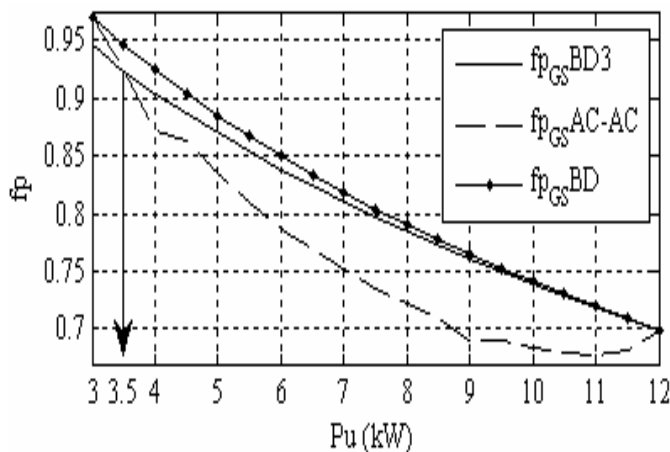


Figura 10: Comparación entre el factor de potencia a la salida del generador cuando se emplea: el rectificador trifásico, fp_{GSBD3} , los convertidores de AC-AC, $fp_{GSAC-AC}$, y los rectificadores monofásicos, fp_{GSBD} .

De la comparación de las curvas de la Figura 10, obtenidas bajo las mismas condiciones, se observa que con el uso de los tres rectificadores monofásicos se supera la dificultad encontrada en el empleo del rectificador trifásico, comentada en la introducción, respecto al factor de potencia para P_U menores e iguales a 3,5 kW.

Los resultados anteriores, disminución en el consumo de energía reactiva, mejora del factor de potencia para el rango de variación de P_U y disminución de la corriente entregada por cada fase del generador validan la propuesta del empleo de los rectificadores monofásicos conmutados con ángulo simétrico.

4. Conclusiones

En el presente artículo se ha cumplido con el objetivo de comparar al rectificador monofásico conmutando al interruptor en serie con la carga con ángulo simétrico, y el convertidor AC-AC, esquema actualmente empleado, respecto al factor de potencia a la salida del generador eléctrico de las microcentrales hidroeléctricas (μ CHs) en las que se regula la frecuencia variando la potencia disipada en cargas lastres mediante convertidores AC-AC.

Para cumplir con este objetivo, han sido obtenidas las expresiones matemáticas de los índices de rendimiento y energéticos en función del ángulo de conmutación del rectificador monofásico tipo puente con interruptor en serie con la carga resistiva, conmutado con ángulo simétrico, la expresión de la potencia reactiva a la entrada de éste demuestra que, con esta conmutación, no se aporta ni se consume energía reactiva, a diferencia del convertidor AC-AC que siempre consume potencia reactiva excepto cuando el ángulo de disparo de los tiristores es 0 rad o $\pi \text{ rad}$. Ésta es una ventaja clave del rectificador monofásico considerado sobre el convertidor AC-AC.

De la comparativa entre el esquema que emplea los rectificadores monofásicos tipo puente con interruptor en serie con la carga lastre conmutado con ángulo simétrico y el que emplea los convertidores AC-AC se demostró, mediante los cálculos y simulaciones realizadas, que con el esquema con rectificadores se mejora el factor de potencia a la salida del generador eléctrico de la μ CH para el intervalo de variación de la potencia activa consumida por los usuarios, disminuyendo la corriente eficaz en cada fase del generador e incrementándose por ende la disponibilidad de éste en cuanto a la entrega de potencia activa.

Por otro lado, con el esquema que emplea los rectificadores monofásicos tipo puente con interruptor en serie con la carga lastre conmutado con ángulo simétrico, queda superada la dificultad presentada por el esquema con el rectificador trifásico tipo puente con interruptor en serie con la carga conmutado con ángulo simétrico, el cual posee factor de potencia en los terminales del generador eléctrico de la μ CH, para bajas potencias activa consumidas por los usuarios, inferior al del esquema que emplea los convertidores AC-AC.

Finalmente, otro aspecto a destacar es que las expresiones matemáticas de la potencia de distorsión para el rectificador monofásico y el convertidor AC-AC indican que ésta es nula para un ángulo de disparo de 0 rad , debido a que, para este

ángulo, la corriente de entrada a ambos circuitos es sinusoidal.

El grupo investigador se plantea, como futuro trabajo de investigación, comparar el rectificador trifásico a diodos tipo puente con interruptor en serie con la carga conmutado con ángulo en adelanto y el convertidor de AC-AC, con respecto al factor de potencia a la salida del generador eléctrico de las microcentrales hidroeléctricas que regulan frecuencia por el método de carga lastre.

Referencias

- Bordons, C., García-Torres, F., Valverde, L., 2015. Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 12, 117–132. DOI: 10.1016/j.riai.2015.03.001
- Bory, H., 2011. Metodología para el mejoramiento del factor de potencia en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en régimen autónomo y que emplean convertidores de CA en CA para la regulación de frecuencia. Tesis de Maestría. Dpto. Automática. Facultad Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Cuba.
- Bory, H., Chang, F., Yero, J., 2014. Conmutación simétrica para control de frecuencia de Minihidroeléctricas. I Convención Internacional de Ciencias Técnicas. 2014. Cuba. ISBN 978-959-207-529-0.
- Bory, H., Martínez, H., Vázquez, L., Chang, F., Enríquez, L., 2018. Comparación entre Rectificador Trifásico con Conmutación Simétrica y Convertidor AC/AC para la Mejora del Factor de Potencia en Microcentrales Hidroeléctricas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 15, 101–111. <https://doi.org/10.4995/riai.2017.8816>
- Colak, I., Kabalci, E., Fulli, G., Lazarou, S., 2015. A survey on the contributions of power electronics to smart grid systems. *Renewable Sustainable Energy* 47, 562–579. doi:10.1016/j.rser.2015.03.031
- Farfán, R., Cadena, C., Villa, L., 2015. Experiencia en el uso de la Lógica Difusa para el Control del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia en convertidores para Módulos Fotovoltaicos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 12, 208–217. DOI: 10.1016/j.riai.2015.03.004
- Farhat, M., Barambones, O., Ramos, J., Duran, E., Andujar, J., 2015. Diseño e Implementación de un Sistema de Control estable basado en Lógica Borrosa para optimizar el rendimiento de un sistema de Generación Fotovoltaico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 12, 476–487. DOI: 10.1016/j.riai.2015.07.006
- García, E., Correcher, A., Quiles, E., Morant, F., 2016. Recursos y sistemas energéticos renovables del entorno marino y sus requerimientos de control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 13, 141–161. DOI: 10.1016/j.riai.2016.03.002
- Hechavarria, M., Bell, O., 2008. Control de frecuencia en centrales minihidroeléctricas aisladas, Trabajo de Diploma. Facultad Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente, Cuba.
- Kurtz, V., Botteró, F., Una alternativa para el control de cargas balasto que Regulan frecuencia y tensión en PCH de operación aislada. Available online: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/44c1e4324ce3998d01c61875a2288b61.pdf>. Consulted: [19-05-2014].
- López, A., Somolinos, J., Núñez, L., 2014. Modelado Energético de Convertidores Primarios para el Aprovechamiento de las Energías Renovables Marinas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 11, 224–235. DOI: 10.1016/j.riai.2014.02.005
- Mare, J., Odello, L., 2001. Reguladores de frecuencia inteligente para microcentrales hidráulicas. Universidad Nacional de COMAHUE, Argentina.
- Naqui, A., Ahmad, A., 2013. A lossless switching technique for smart grid applications. *Int J Electr Power Energy Syst* 49, 213 – 220.
- Ortega, R., Carranza, O., Sosa, J., García, V., Hernández, R., 2016. Diseño de controladores para inversores monofásicos operando en modo isla dentro de una microrred. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 13, 115–126. DOI: 10.1016/j.riai.2015.09.010
- Peña, L., Dominguez, H., Fong, J., García, J., Alzórris, P., Regulación de frecuencia en una Minihidroeléctrica por carga lastre mediante un pc Embebido. Universidad Politécnica de Cataluña. Available online: <http://www.aedie.org/9CHLIE-paper-send/291-PE%DI A.pdf>. [Consulted: 12-06-2013]
- Piris-Botalla, L., Oggier, G., Airabella, A., García, G., 2016. Extensión del Rango de Operación con Conmutación Suave de un Convertidor CC-CC Bidireccional de Tres Puertos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 13, 127–134. DOI: 10.1016/j.riai.2015.04.007
- Real, C., Moreno, A., Pallares, V., Gonzales, M., Moreno, I., Palacios, E., 2017. Sistema Electrónico Inteligente para el Control de la Interconexión entre Equipamiento de Generación Distribuida y la Red Eléctrica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 14, 56–69. DOI: 10.1016/j.riai.2016.11.002
- Vasquez, H., Pinedo, C., Palacios, J., Ramirez, J., Regulación de frecuencia en Micro-centrales hidroeléctricas mediante compensación de la carga. Universidad del Valle Available: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/1216/1/Regulacion%20de%20frecuencia%20en%20microcentrales.pdf> [Consulted: 20-03-2014]
- Wu, D., Tang, F., Dragicevic, T., Vasquez, J., Guerrero, J., 2014. Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids With Photovoltaic Generation and Energy Storage System. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 4, 882-892.